

1/2 궤도차량에 대한 반능동 현수장치 제어 알고리즘들의 성능평가

Performance Evaluation of Control Algorithms for 1/2 Tracked Vehicle with Semi-Active Suspension System

윤 일 중*, 임 재 필*, 신 휘 범**, 이 진 규***, 신 민 재****
Iljoong Youn, Jaepil Im, Hwibeom Shin, Jinkyoo Lee, Minjae Shin

ABSTRACT

2 DOF half-car model with 6 semi-active suspension units is utilized to evaluate the tracked vehicle dynamic performance simulated by several suspension control algorithms. The target of this research is to improve the ride comfort to maintain operator's handling capability when the tracked vehicle travels fast on the rough road. The control algorithms for suspension systems, such as full state feedback active, full state feedback semi-active, sky-hook active, sky-hook semi-active, and on-off systems, are evaluated and analyzed in view point of ride comfort. The dynamic performances of vehicle are expressed and evaluated by vibratory characteristic evaluation curves, performance indices and frequency characteristic curves. The simulation results show that the performances of sky-hook algorithms for ride comfort nearly follow those of full state feedback algorithms and on-off algorithm is recommendatory when the vehicle runs relatively fast.

주요기술용어 : Tracked vehicle(궤도차량), Semi-active suspension system(반능동현수장치), Vibratory characteristic evaluation(진동특성평가), Frequency characteristic curve(주파수특성곡선)

Nomenclature

a_i : distance from mass center to suspension, m
 I : moment of inertia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 k_i : i th suspension stiffness, N/m

M : body mass, kg
 m : operator's mass, kg
 u_i : control force of i th actuator, N
 z_c : vertical position of mass center, m
 z_{0i} : vertical position of i th road wheel, m
 θ : pitch angle about mass center, rad
 ρ_i : weighting factors in performance index

* 회원, 경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구소

** 경상대학교 전기공학과

*** 회원, 동명중공업(주)

**** 국방과학연구소

1. 서 론

차량의 동적 특성을 수요자가 원하는 방

향으로 향상시키는 데에는 여러 가지 방법이 존재한다. 첫째는 고유 특성과 성능 요구 조건에 합당한 시스템의 매개변수를 결정하는 것이고 둘째 방법은 시스템의 구조를 개선하는 방법이며 셋째는 능동적인 제어를 하는 것이다. 이 연구에서는 세 번째 방법을 통해서 시스템의 동적 특성을 향상시키는 것이 목표이다. 반능동형 액추에이터로서는 ER유체를 이용한 가변 댐퍼를 사용한다. 능동과 반능동 현수장치의 다른 점을 단적으로 구분하면 힘의 공급과 흡수를 모두 할 수 있는 제어시스템과 흡수력만을 제어할 수 있는 시스템의 차이라고 말할 수 있다. 그 외 부수적인 제어장치가 있는 현수장치는 적응(adaptive) 능동 또는 적응 반능동 현수장치라고 말하는 편이 맞을 것이다. 이 연구의 목표는 궤도 차량에 ER유체를 이용한 반능동 현수장치를 장착한 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 시스템의 효율적인 제어를 설계하는 것이다.

궤도차량에 반능동 현수장치를 장착하여 성능평가를 하기 위해서는 성능향상의 목표를 정량적으로 인식해야 한다. 이 연구의 정량적인 목표는 궤도 차량이 지정된 노면위를 빠른 속도로 주행할 때에 운전자가 조종력을 유지할 수 있는 최대 속도를 높이는 것이다. 이는 승차감 문제이다. 일반적인 차량의 현수장치를 설계할 때에는 승차감과 조종안정성의 상충되는 조건을 적당히 조절해서 설계하지만 궤도차량의 경우 조종안정성 문제는 속도가 일반 차량보다 상대적으로 느리기 때문에 중요성이 다소 떨어진다. 대신에 충격성능향상이 승차감 향상과 상충 특성을 갖는다. 충격성능평가 방법은 궤도 차량이 범프를 통과할 때 차량의 로드휠이 노면에서 이탈되었다가 바닥에 부딪치는 충격량을 측정하는 방법이다. 일반적으로 승차감을 높이기 위해서는 현수장치를 부드럽게(soft) 해주어야 하는 반면 현수장치가 부드러워지면 충격성능평가에서는 바텀밍

(bottoming) 현상이 쉽게 일어나기 때문에 딱딱한(hard) 현수장치에 비해서 훨씬 충격량이 많아 나쁜 성능을 나타낼 수 있다. 그러한 이유로 충격성능평가 때에는 부드러운 현수장치보다는 딱딱한 현수장치가 더 좋은 평가 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 궤도차량에서는 승차감과 주행안정성의 상충조건을 조절하기보다는 승차감과 충격특성의 상충조건을 조절해서 현수장치를 설계한다고 말하는 편이 바람직하다.

승차감의 관점에서 성능향상을 위한 평가 방법을 생각해 보면, 첫째로는 진동성능평가가 있다. 여러 종류의 거칠기가 다른 노면위를 운전자가 조종력을 잃지 않고 주행할 수 있는 최대속도를 측정하는 방법이다. 최대로 인내할 수 있는 운전자의 흡수동력을 6와트(Watt)로 가정해서 그 때의 속도를 측정한다. 여러 가지 제어 방법에 따라서 성능의 차이를 찾아볼 수 있다. 두 번째로는 최적제어 이론에서 목적 함수에 포함되어 있는 각 성능(RMS)값을 비교 평가하는 방법이다. 이 방법은 어떤 일정한 속도와 노면에서 각 제어 로직이 차량의 성능에 미치는 바를 비교할 수 있는 방법이다. 세 번째 방법은 주파수 영역에서 각 제어기의 성능을 평가하는 방법이다.

본 연구에서는 반 차 모델에 6개의 능동형이나 반능동형 현수장치를 장착해서 여러 종류의 제어알고리즘을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 그 성능을 비교 평가하였다. 제어 알고리즘으로서는 전상태 피드백(full state feedback) 능동(active), 전상태 피드백 반능동(semi-active), 스카이훅(sky hook) 능동, 스카이훅 반능동, 과 on-off 제어 알고리즘들이 있으며, 이런 제어로직들은 승차감 위주로 설계되어 시뮬레이션을 통해서 수동형(passive)과 비교 평가되었다. 이 연구에서 사용된 모든 평가는 Matlab으로 수행되었고 Simulink에서 나온 시스템의 동적 데이터는 평가하는데 사용되었다.

2. 반차량 모델링

Fig. 1은 여러 가지 제어로직의 성능 평가가 수행될 반 차의 단순 모델이다.

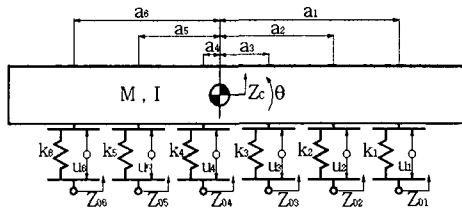


Fig. 1 Modeling of a half vehicle with 6 suspension units

시스템의 상태(state)들과 노면 속도 외란은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z_c + a_1\theta - z_{01} & x_5 &= z_c - a_4\theta - z_{04} \\
 x_2 &= \dot{z}_c + a_1\dot{\theta} & x_6 &= z_c - a_5\theta - z_{05} \\
 x_3 &= z_c + a_2\theta - z_{02} & x_7 &= z_c - a_6\theta - z_{06} \\
 x_4 &= z_c + a_3\theta - z_{03} & x_8 &= \dot{z}_c - a_6\dot{\theta} \\
 w_i &= \dot{z}_{0i} \quad i=1 \dots 6
 \end{aligned}$$

Table 1 Parameter values of a half vehicle used for simulation

Parameters	Value	Units
M	12420	kg
I	36500.6495	kg · m ²
k ₁ , k ₂ , k ₃ , k ₄ , k ₅ , k ₆	250,000	N/m
a _i	(3.656-i)*0.8	m
V _{min}	1000	N · s/m
V _{max}	100000	N · s/m
V _{minD} , V _{maxD} (Passive)	10000	N · s/m
ρ ₁	1	-
ρ ₂ , ρ ₃ , ρ ₄ , ρ ₅ , ρ ₆ , ρ ₇	1000	-
ρ ₈ , ρ ₉ , ρ ₁₀ , ρ ₁₁ , ρ ₁₂ , ρ ₁₃	0.0000001	-

시뮬레이션에 사용되는 매개변수들은 Table 1과 같다. 6개의 로드휠로 된 시스템의 동특성 방정식들은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 u는 능동 제어력이지만 반능동 시스템에서는 댐퍼에 의한 흡수력을

제어력으로 환산하여 고려해야 한다.

$$\begin{aligned}
 M \ddot{z}_c &= \sum_{i=1}^6 R_i \\
 I \ddot{\theta} &= \sum_{i=1}^3 a_i R_i - \sum_{i=4}^6 a_i R_i
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 R_i &= k_i [z_{0i} - (z_c + a_i\theta)] + u_i \quad i=1, 2, 3 \\
 R_i &= k_i [z_{0i} - (z_c - a_i\theta)] + u_i \quad i=4, 5, 6
 \end{aligned}$$

상태공간 방정식(state space equation)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{D} \mathbf{w} \\
 &= \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{w} \\
 \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{L} \mathbf{w}
 \end{aligned}$$

여기서, $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{N}^T + \mathbf{B}^T\mathbf{P})$ 이다.

제어기로 최소화시켜야 할 성능지수(performance index)는 다음과 같다

$$\begin{aligned}
 J &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T [\dot{z}_c^2 + \rho_1 \dot{\theta}^2 + \rho_2 x_1^2 \\
 &\quad + \sum_{i=3}^7 \rho_i x_i^2 + \sum_{i=1}^6 \rho_{i+7} u_i^2] dt \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_0^T [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + 2\mathbf{x}^T \mathbf{N} \mathbf{u} \\
 &\quad + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt
 \end{aligned}$$

여기서, \mathbf{Q} 와 \mathbf{R} 은 대칭행렬(symmetric matrix)이고 $\mathbf{Q} \geq 0$, $\mathbf{R} > 0$ 이다.

3. 승차감 성능평가를 위한 블럭선도

평균 흡수동력을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{av} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T F(t) V(t) dt$$

여기서, $F(t) = m \cdot a(t)$ 이고 m은 운전자의 평균 몸무게이며 70 kg이라고 가정한다. $a(t)$ 는 상하가속도이고, $V(t)$ 는 차량의 주행속도이다. 운전자의 위치는 무게중심에서 앞쪽으로 1.5245m 떨어져 있다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 4가지 다른 거칠기의 노면 위를 주행할 때 차량의 속도와 평균흡수동력과의 관계를 그래프로 표현하여 제어기의 종류에 따른 성능이 승차감 측면에서 비교 평가된

다. Fig. 2는 능동 현수장치나 반능동 현수장치로 이루어진 반차 모델을 시뮬레이션하기 위해서 Matlab의 Simulink로 만들어진 블록선도이다. 노면의 위치 입력을 받아 로드휠 사이의 거리만큼 속도에 따른 시간지연을 적용해서 각 로드휠에 외란으로 입력한다. 여기서는 노면 속도가 외란으로 입력되므로 노면의 위치를 먼저 저역통과필터(low pass filter)를 통과하고 시간으로 미분해서 다시 한번 필터링한 속도 성분이 외란으로 입력된다.

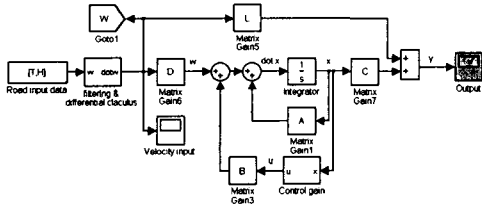


Fig. 2 Main block diagram for the simulation

Fig. 3은 반능동 현수장치에서 일정한 가변 구간의 구속조건을 갖는 가변 댐퍼의 댐핑 계수를 구하고 그 댐퍼에 의해서 흡수하는 제어력을 계산하는 부가시스템이다. 가변 댐퍼의 댐핑 계수를 결정할 때 현수장치의 상대속도에 의해서 나누어지는 과정이 필연적인데 상대속도가 0이면 연산 불가능상태가 발생하므로 이때에는 연산을 하지 않고 댐핑 계수를 바로 전 상태로 유지하므로써 그 단계를 벗어나는 로직을 사용한다. Fig. 4에서는 on일 때 댐핑 계수가 20000[N·sec/m]이고 off일 때 5000[N·sec/m]이다. 요구되는 댐핑 계수를 구해서 on-off를 결정하는 로직이다. 중간 값을 기준으로 on-off를 결정하면 너무 자주 변하는 경우가 생길 수 있으므로 다음과 같은 로직을 만들었다.

$$\begin{aligned} &\text{when } d_{i-1} = \text{off} \\ &\quad d_i = \text{on} \quad \text{if } v_i > 11000 \\ &\quad d_i = \text{off} \quad \text{otherwise} \\ &\text{when } d_{i-1} = \text{on} \\ &\quad d_i = \text{off} \quad \text{if } v_i < 9000 \\ &\quad d_i = \text{on} \quad \text{otherwise} \end{aligned}$$

여기서 v_i 는 요구되는 댐핑 계수값이고 d_i 현재의 댐핑 상태이다. 실제 시뮬레이션에 의한 on-off 댐핑 계수의 변하는 모습을 Fig. 8에서 볼 수 있다.

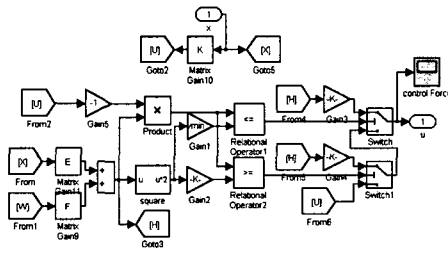


Fig. 3 Block diagram which calculates the control force for semi-active suspension system

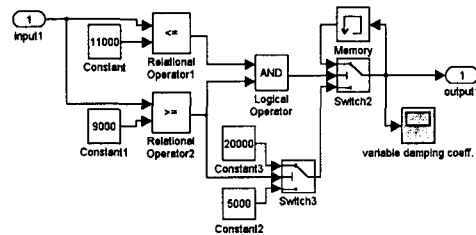


Fig. 4 Comparison and decision part of damping coefficients in on-off suspension control system

4. 결과 분석

4.1 진동성능평가

Fig. 5에서는 수동 현수장치, 전상태 피드백 능동 현수장치와 스카이훅 개념을 적용한 능동 현수장치의 승차감 성능을 평가하기 위해 4가지 거칠기의 노면 위를 주행할 때 차속과 흡수동력과의 관계를 그래프로 나타내었다. 수동 현수장치의 댐핑 계수는 10,000 [N·s/m]이고 스프링 상수는 250,000[N/m]을 사용하였다. 전상태 피드백 능동 현수장치의 제어력은 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = -R^{-1}(N^T + B^T P) \mathbf{x} = -K \mathbf{x}$$

여기서, K는 제어 게인(gain)이고 승차감 향상을 위해서 설계된 값은 다음과 같다.

$$K = -1 \times 10^4 \begin{pmatrix} 0.0807 & -1.3569 & 0.1678 & 0.2548 & 0.3418 & 0.4288 & 0.5159 & -0.0323 \\ 0.2284 & -1.0902 & 0.2663 & 0.3041 & 0.3420 & 0.3799 & 0.4178 & -0.3084 \\ 0.3760 & -0.8235 & 0.3648 & 0.3535 & 0.3422 & 0.3310 & 0.3197 & -0.5845 \\ 0.5267 & -0.5568 & 0.4633 & 0.4029 & 0.3424 & 0.2820 & 0.2216 & -0.8605 \\ 0.6713 & -0.2902 & 0.5618 & 0.4522 & 0.3426 & 0.2331 & 0.1236 & -1.1366 \\ 0.8189 & -0.0235 & 0.6603 & 0.5016 & 0.3428 & 0.1842 & 0.0255 & -1.4126 \end{pmatrix}$$

차체 양단의 현수장치 장착점 위에 2개의 속도 값에 대한 계측 값과 6개 현수장치의 상대 변위들에 대한 계측 값들이 제어 계인 6x8의 행렬과 곱해져서 각 6개의 액추에이터 제어력을 계산한다. 그래프에서 실선은 위 제어기의 이상적인 승차감 향상 효과를 보여준다. 일점 쇄선은 전상태 피드백의 제어 계인 중에서 차체 양단 장착점(mounting point)의 속도성분에 해당하는 값만 남기고 나머지 값은 모두 0으로 만든다. 다시 말하면 두 개의 속도 값만 계측해서 제어력을 계산하는데 사용하는 것이다. 승차감 위주의 제어기 설계에서는 차체의 속도 성분에 의해서 생성되는 제어력의 크기가 현수 상대 변위에 의해서 생성되는 제어력에 비해 압도적으로 크기 때문에 현수 상대 변위에 의해서 계산되는 제어력은 무시해도 성능에는 큰 차이가 없음을 보여준다. 차체의 절대 속도에 제어 계인이 곱해져서 제어력을 계산하므로 스카이훅 댐퍼라고 명칭한다. 일종의 출력 피드백(output feedback)이다. 스카이훅 댐퍼 개념의 능동 현수장치 제어 계인은 다음과 같다.

$$K = 1 \times 10^4 \begin{pmatrix} 0 & 1.3569 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0323 \\ 0 & 1.0902 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3084 \\ 0 & 0.8235 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5845 \\ 0 & 0.5568 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8605 \\ 0 & 0.2902 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.1366 \\ 0 & 0.0235 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.4126 \end{pmatrix}$$

Fig. 6에서는 반능동 현수장치들의 진동 특성곡선을 보여준다. 시뮬레이션에서 주어진 전상태 피드백 반능동현수장치의 댐핑 계수의 가변 범위는 1000[N·sec/m]에서 100000[N·sec/m]이다. 가변 댐퍼에 의한 흡수력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u(t) = -(\text{diag } v)[Ex + Fw]$$

$$\text{여기서, } E = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(a_6 + a_2)}{(a_1 + a_6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(a_1 - a_2)}{(a_1 + a_6)} \\ 0 & \frac{(a_6 + a_3)}{(a_1 + a_6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(a_1 - a_3)}{(a_1 + a_6)} \\ 0 & \frac{(a_6 - a_4)}{(a_1 + a_6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(a_1 + a_4)}{(a_1 + a_6)} \\ 0 & \frac{(a_6 - a_5)}{(a_1 + a_6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(a_1 + a_5)}{(a_1 + a_6)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

F = -I 이다.

실선은 전상태 피드백 능동 제어력에서 흡수력에 해당하는 힘만을 생성할 수 있을 때에 나타나는 효과를 보여준다. 일반적으로 승차감 위주의 제어력을 요구할 때에는 요구되는 제어력이 대부분 흡수력이기 때문에 그 효과는 대단히 크다고 말할 수 있다. 일점 쇄선은 위에서 언급한 차체 양단 장착점의 속도성분과 그에 해당하는 제어 계인(sky-hook damping coefficients)의 곱에 의해서 계산된 제어력에서 흡수력만 가변 댐퍼에 적용시켜 시뮬레이션한 결과이다. 가변 댐핑 계수는 그 제어력을 현수 상대 속도로 나눈 값이 된다. 단 댐핑 계수는 양의 값이다. 실선과 일점 쇄선을 비교해 보면 거의 성능이 비슷함을 알 수 있다. 결론적으로 승차감 위주의 제어기 설계에서는 스카이훅 개념의 설계가 실제 장치를 구현하는데 효과적이라고 말할 수 있다. 전상태 피드백 반능동 현수장치에서 필요한 측정 값은 2개의 차체 속도 및 6개의 현수 상대 변위 와 속도가 필요한 반면 스카이훅 반능동 현수장치는 2개의 속도와 6개의 상대 속도 값이 필요하다. 점선은 on-off 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 여기에서 나온 결과는 흡수동력이 적게 걸리는 상대적인 저속에서는 on-off의 성능이 위의 다른 반능동 현수장치에 비해서 많이 떨어지지 않는다. 그래프에서 보면 on-off 시스템이 다른 반능동 현수장치들의 성능을 거의 따라감을 알 수 있다. 시스템을 구현하는 종합적인 측면에서 관찰할 때 운전자의 조종력을 잃지 않고 속도를 높여 주는 것이 주된 목표라면 on-off 시스템이 적절할 것으로 본다. 왜냐하면 연속가변 댐퍼는 시간지연과 같은 오차가 성능을 악화시킬 수 있는 여지가

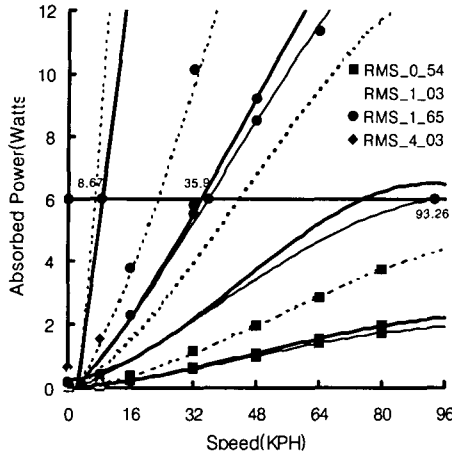


Fig. 5 Vibratory performance evaluation curve for active suspension & passive suspension systems

- a) -----: passive suspension system
- b) ———: full state feedback active suspension system
- c) ———: active suspension system with sky-hook damper

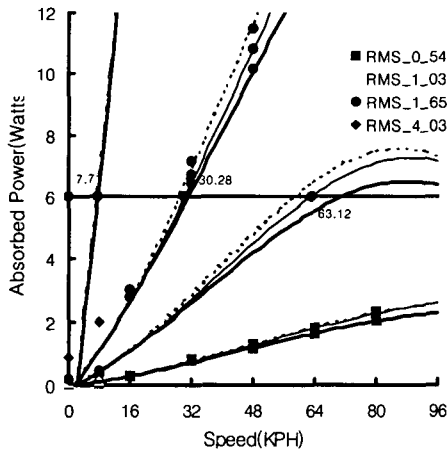


Fig. 6 Vibratory performance evaluation curve for semi-active suspension & on-off suspension systems

- a) ———: full state feedback semi-active suspension system
- b) ———: semi-active suspension system with sky-hook damper
- c) -----: on-off suspension system

on-off에 비해서 많다고 말할 수 있고 시스템을 구성하는 비용도 훨씬 많이 들기 때문

이다. 다른 대안은 승차감과 조종의 한계를 동시에 좀 더 높이기 위해서라면 일정한 저속 운행에서는 연속 가변 댐핑 로직을 사용하다가 일정 속도 이상에서는 on-off로직을 사용하는 것이다. on-off를 사용할 때의 장점은 시간지연(time delay)에서 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있고 댐핑 계수의 가변 영역이 좁아도 성능 향상이 된다는 것이다. Fig. 7은 각 노면의 거칠기에 따른 흡수 동력이 6 와트가 될 때의 차량의 속도를 그래프로 보여준다. 여기에서 단적으로 3가지의 반응동 현수장치들의 성능이 거의 접근하고 있음을 보여준다.

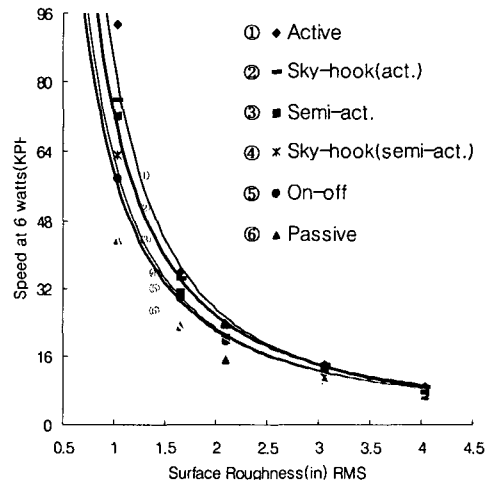


Fig. 7 Comparison of absorbed power obtained by each suspension type in viewpoint of speed & RMS value

4.2 성능지수 비교와 가변 댐핑 계수의 변화

차량이 10m/sec의 속도로 RMS 1.65인치 (inch) 노면 위를 달릴 때의 시뮬레이션 결과인 Table 2의 승차감 성능부분인 히빙 가속도(heaving acc.)와 피칭 가속도(pitching acc.)의 RMS값을 살펴보면 on-off 시스템의 성능이 많이 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 RMS 1.65인치 노면을 31.193 KPH로 달릴 때, 위에서 언급한 3가지의 반응동 현수장치들을 시뮬레이션한 결과들 중,

Table 2 Components of performance indices for the RMS 1.65 in the design with ride comfort preference

순번	Control logic	Road data : RMS 1.65[%]								
		$E(\ddot{z}_c^2)$	$E(\ddot{\theta}^2)$	$E(x_1^2)$	$E(x_3^2)$	$E(x_4^2)$	$E(x_6^2)$	$E(x_5^2)$	$E(x_7^2)$	J_{avg}
1	Passive	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	Active	67.31	58.59	64.18	56.38	69.09	80.21	61.17	48.16	60.61
3	Semi-act.	81.73	70.31	73.75	66.49	69.09	81.25	68.93	59.53	70.22
4	On/Off	107.69	81.51	78.16	72.87	80.0	89.58	77.18	69.57	79.17
5	Sky hook	72.11	62.50	63.03	56.38	76.36	85.42	63.11	50.84	62.18
6	Sky hook Semi-act	81.73	73.70	73.00	66.49	76.36	85.42	70.39	61.20	71.57

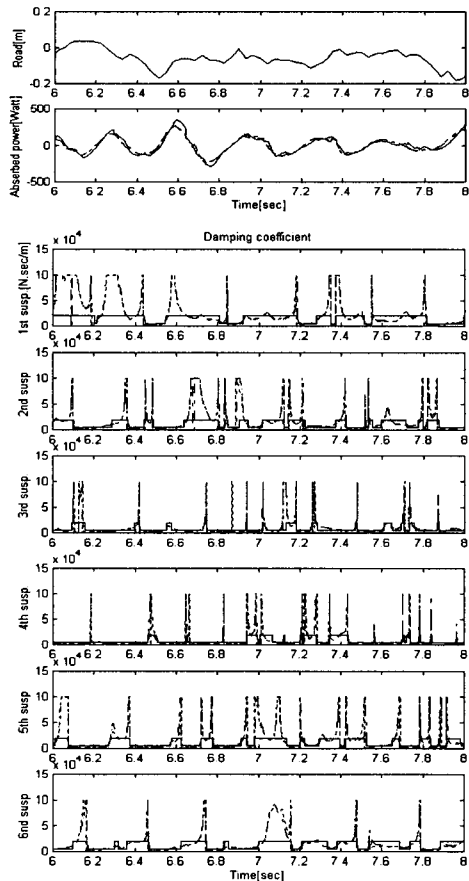


Fig. 8 Variation of absorbed power and damping coefficients when the vehicle with continuous variable dampers or on-off dampers runs on the RMS 1.65 inch road

- a) - - - - : full state feedback semi-active suspension
- b) - . - . : semi-active suspension system with sky-hook damper
- c) ——— : on-off suspension system

운전석의 흡수동력과 각 현수장치의 가변 댐핑 계수들의 변화하는 모습을 보여준다. 이것 역시 6개의 on-off 가변 댐핑 계수의 변화하는 양상을 살펴 보면 가운데에 있는 현수장치는 주로 부드러운(soft) 경향이 있고 양단으로 갈수록 딱딱(hard)할 때가 많다는 것을 알 수 있다. 그러므로 승차감 위주의 수동 현수장치를 설계할 때에는 가운데의 현수장치는 부드럽게 바깥쪽의 현수장치는 딱딱하게 설계하는 것이 합리적이라 생각한다. 이 경우는 3가지 시스템들의 흡수 동력이 거의 6 와트일 때이다. 흡수 동력 그래프를 보면 잘 알 수 있듯이 on-off 시스템이 다른 2가지 반능동 현수장치들의 승차감 성능에 거의 근접한다.

4.3 주파수 특성곡선

주파수 영역에서 성능 평가는 함축된 많은 정보를 얻을 수 있다. 선형시스템인 능동형은 전달함수를 이용해서 주파수 특성곡선을 얻을 수 있는 반면 반능동형은 비선형이기 때문에 시간영역에서 입력과 출력의 진폭비를 이용해서 구하였다. Fig. 9와 10은 각 제어 로직의 승차감 성능이 비교되어 진다. Fig. 9에서는 6개의 로드휠에 똑같은 삼각함수 파형을 입력하여 히빙(heaving) 입력에 대한 차체 무게중심의 상하가속도를 구하여 주파수 특성곡선을 찾아내었다. Table 2의 결과와 같이 능동형이나 반능동형에서 전상태 피드백과 스카이훅 제어로직의 성능이 거의 같음을 알 수 있다. Fig. 10에서는 6개의 로드

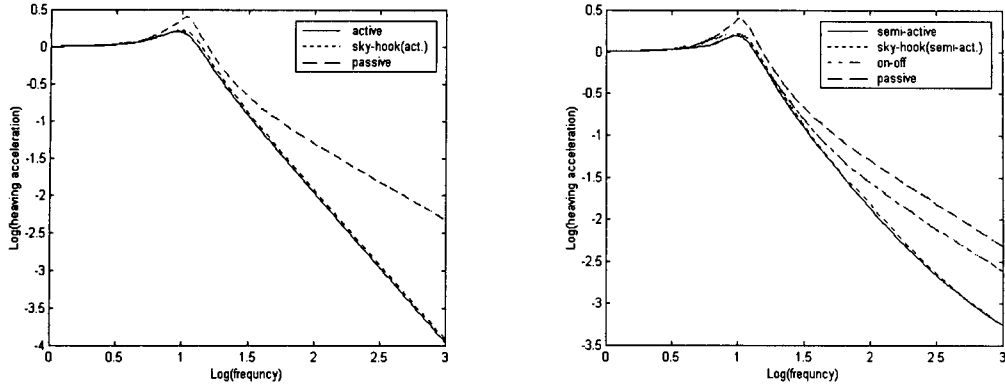


Fig. 9 Frequency characteristics for the heaving acceleration of the body under the heave input

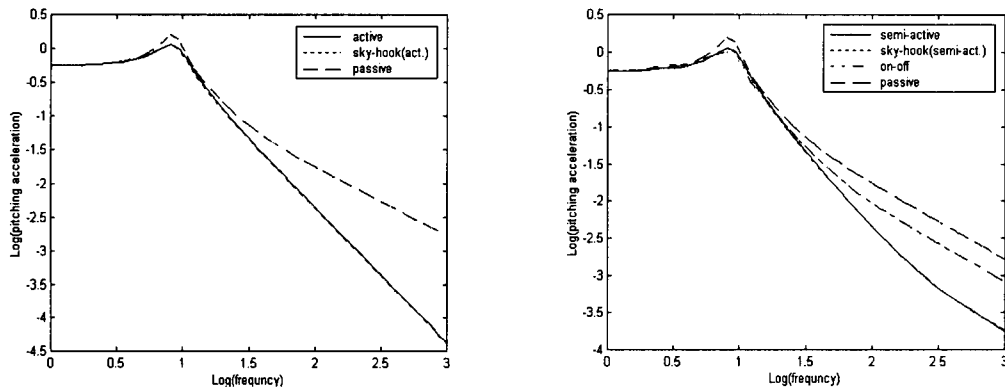


Fig. 10 Frequency characteristics for the pitching acceleration of the body under the pitch input

휠에 순서대로 $\pi/5$ 의 위상차 삼각함수 파형을 입력함으로서 피칭(pitching)입력에 대한 차체 피칭가속도를 구하여 주파수 특성곡선을 찾아내었다. 그림 9와 10을 비교하면 히빙과 피칭가속도의 주파수 특성의 경향이 거의 같음을 알 수 있다.

5. 결론

진동성능평가를 통해서 분석한 바에 따르면 승차감을 향상시키는 데에는 차체(sprung mass)의 속도 값만 측정해서 제어기에 적용하는 스카이훅 제어력이 전상태 피드백 제어력의 크기와 거의 같다는 사실이다. 다시 말

해서 제어 게인이 차체의 속도 값과 곱해지면서 계산되는 제어력 부분이 현수의 상대 변위 값과 곱해져서 만들어지는 제어력 부분보다 일반적으로 훨씬 크기 때문에 상대 변위에 상응하는 제어 게인과 상대 변위의 계측값은 무시해도 성능에는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 말한다. 그러나 제어 게인이 주행안정성을 위해서 설계된 값일 때에는 현수의 상대 변위에 의해서 계산되는 제어력이 상당히 크기 때문에 무시하면 성능에 많은 영향을 미칠 것이다. 본 연구의 목적이 운전자가 6 와트 부근의 흡수 동력을 받을 때 조종능력을 상실하므로, 각 노면에 따른, 흡수 동력 6 와트에서의 차량의 속도를 최대한 높이고 또한 낮은 속도에서는 승차감을 적당히

향상시키는 것이라고 한다면, 저속에서는 연속 가변 제어 로직을 적용하고 일정 속도 이상에서는 on-off 제어로직을 사용하는 반능동 현수장치를 적용하면 우리가 추구하는 목적은 충분히 달성할 것으로 사료된다. 실제로 12개의 현수장치로 이루어지는 시스템에

서는 12개의 on-off 조합만으로도 상당히 다양한 특성을 만들어 낼 수 있으므로 궤도차량에서는 on-off 제어기도 고려할 만하다. Fig. 8에서 주로 사용되는 댐핑 계수의 범위는 일정 구간 이내이고 극대값을 요구하는 것은 순간적이라는 사실을 알 수 있다. 실제로는 높은 범위의 댐핑 계수는 거의 필요 없다는 것이다. 설사 가변 범위가 넓은 가변 댐퍼를 개발했다 해도 순간적으로 댐핑 계수가 올라갔다가 내려 와야하는 경우가 대부분이기 때문에 높은 댐핑 계수는 거의 사용이 불가능하다. 결론적으로 적당한 범위의 가변 댐퍼로서 충분한 반능동 현수장치의 성능을 구현할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소와 동명중공업

(주)의 연구비 지원으로 수행된 산학연 협동 연구과제로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 한인식, 신민재, 서문석, "30톤급 궤도차량용 ERSU 개략 설계보고서", 국방과학연구소, 1998.
- 2) 최승복 외 6인, "능동형 현수장치 적용을 위한 최적 ER 유체 조성 및 제어기법 연구 (II)", 국방과학연구소 연구보고서, 1999.
- 3) I. Youn, "Optimal Control of Semi-Active Automobile Suspension Including Preview Information", Ph.D dissertation, State University of New York at S.B., 1992.
- 4) 전도영, 박찬호, 유정열, "MR 댐퍼를 이용한 반능동식 진동제어, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 4권, 1호, pp.26-31, 1998.
- 5) 배종인, 박명관, 주동우, "전기유변유체댐퍼의 유전자알고리즘에 의해 설계된 퍼지 제어", Proceedings of the 12th KACC, pp.438-441, 1997.
- 6) 김재용, 서문석, "궤도차량 소개 및 군용 궤도차량 현수장치 설계 특징", 자동차공학회지, 6월호, pp.16-22, 2000.